

衝撃波の三次元的反射に関する研究

著者	目黒 俊勝
号	1756
発行年	1995
URL	http://hdl.handle.net/10097/7029

氏 名	目 黒 俊 勝
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	衝 撃 波 の 三 次 元 的 反 射 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 高 山 和 喜
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 高 山 和 喜 東 北 大 学 教 授 Park Chul 東 北 大 学 教 授 中 橋 和 博 東 北 大 学 教 授 神 山 新 一 東 北 大 学 教 授 井 上 督

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

超音速航空機まわりの衝撃波，プラントの配管内に現われる衝撃波，自動車エンジンの排気管内に発生する弱い衝撃波，あるいは，火山の爆発的噴火に現われる衝撃波現象はいずれも三次元的な挙動を示す。衝撃波の三次元的反射の解明は，これらの三次元衝撃波現象の解析に必要で，重要な課題である。

従来の衝撃波反射の議論は二次元現象に限られ，現在，衝撃波の二次元的な反射形態は詳細に分類されている。一方，衝撃波の三次元的な反射に関しては，その反射形態を可視化することが困難なため，十分に研究されていない。したがって，衝撃波力学の研究では，衝撃波の三次元的な反射を理解することは重要である。

直交する二つのくさびで設定される三次元的な流路は，超音速航空機の空気取り入れ口を近似し，主に定常流の数值的・実験的解析がある。しかし，このような三次元的な流路を伝播する非定常衝撃波の三次元的反射に関する報告はなく，また，衝撃波の三次元的反射がどのような形態をとるか不明な点が多い。

以上の問題を解明することを目指し本研究は，まず，衝撃波の三次元現象を可視化するため，無隔膜衝撃波管に用いられる急速開口弁の流路形状を最適化した後，三次元衝撃波現象の可視化に有利な100mm×180mm衝撃波管を無隔膜方式に改良し，また，三次元的な衝撃波面を可視化する方法を開発した。次に，実験結果を解釈するために，三次元数値計算を実施した。数値解の精度を検証するため，計算結果を干渉縞分布で表示する方法を提唱する。これらの実験法および数値計算法を用い，直交する二つのくさびを過ぎる衝撃波の三次元的反射を解析した。二つのくさびの交わる線に沿って現われる衝撃波の三次元的な反射形態およびそこに誘起される圧力および温度の上昇などを定量的にはじめて明らかにした。

第 2 章 三次元衝撃波の実験方法に関する研究

衝撃波現象の解明に各種形状の衝撃波管が用いられているが，本研究では，衝撃波の三次元現象を広い視野で可視化するため，低圧室断面が100mm×180mmの大型衝撃波管を用いる。一方，従来用いられてきた隔膜破断方式の衝撃波管では，得られる衝撃波のマッハ数は実験毎に約±1.0%ばらつくことは止むを得ないとされた。衝撃波現象を精密に計測

するとき、この衝撃波マッハ数のばらつきは著しい障害となる。本章では、100mm×180mm衝撃波管にピストン急速開口弁に用いる無隔膜衝撃波管に改良するため、小型の急速開口弁方式無隔膜衝撃波管の試作および数値計算による急速開口弁流路形状の最適化を行い、この理解を100mm×180mm衝撃波管に適用した。改良の結果、隔膜破断方式の場合に比して、非常により再現性を得ることができた。

衝撃波の三次元現象の可視化では、物体光に拡散光を用いる二重露光ホログラフィー干渉計法が有効である。しかし、ホログラフィー干渉計法では、再生で得られる干渉縞は光路方向の密度の積分値を意味するので、光路長が局所的に異なり、また、光路長に沿って密度が異なる三次元流れ場を可視化する場合、三次元情報を含むホログラムを異なる視野の方向から再生すれば、一応、流れ場の情報を取り込むことはできるが、この解析は単純ではない。本章では、物体光に拡散光を用いる二重露光ホログラフィー干渉計法を用い、三次元的な衝撃波面を明瞭に表示することを目指し、二重露光の時間間隔を非常に短くした二重露光ホログラフィー干渉計法を開発した。衝撃波の三次元的反射を観察し、従来の結果に比して、非常により空間解像を得、はじめて三次元的な衝撃波面を定性的に可視化することに成功した。

第3章 三次元衝撃波現象に最適な数値計算法に関する研究

数値計算法は様々な条件のもとでの流れを模擬でき、さらに、定量的に解析できる有力な手段では、現在の流体力学の分野において不可欠な解析手法である。特に、軸対称流れあるいは三次元流れなど、光学可視化実験から得られる情報が光路方向の密度の積分値である場合、内部の任意断面上の流れを解析することは難しいので、数値計算は実験に代って流れを詳細に解析する有効な方法である。本章では、加重平均流束法を二次元および軸対称の非粘性流れ、三次元の非粘性・粘性流れの計算に適用し、その概要を示す。さらに、加重平均流束法で二次元・軸対称・三次元の非粘性流れを解き、他の数値計算法の結果と比較し、得られる解の精度を検討した。二次元・軸対称・三次元の計算結果の評価には、二重露光ホログラフィー干渉計法の干渉計写真を用いた。計算結果を干渉縞分布で表示し、干渉計写真と定量的に比較することについて詳細な検討を試みた。また、軸対称流れあるいは三次元流れの場合、可視化実験の干渉縞分布は光路方向の密度の積分値を意味するので、計算結果も実験の設定に合わせて密度を光路方向に積分し、干渉縞で表示する。特に、三次元流れの可視化実験では、光路の設定あるいは可視化すべき現象によって、三次元的な指向性を持って撮影するが、計算結果も同様の実験的表示に一致させる必要がある。したがって、任意の方向か計算結果を積分し、三次元数値計算結果の表示法とその評価法を確立した。この手法により、はじめて計算結果と実験結果と有機的に結びつけることができた。また、数値計算法の解の精度を検証した結果、衝撃波マッハ数3以下の衝撃波の反射・回折現象に対して、加重平均流束法により得られる結果は実験結果とよく一致することを確認した。

第4章 衝撃波の三次元的反射に関する研究

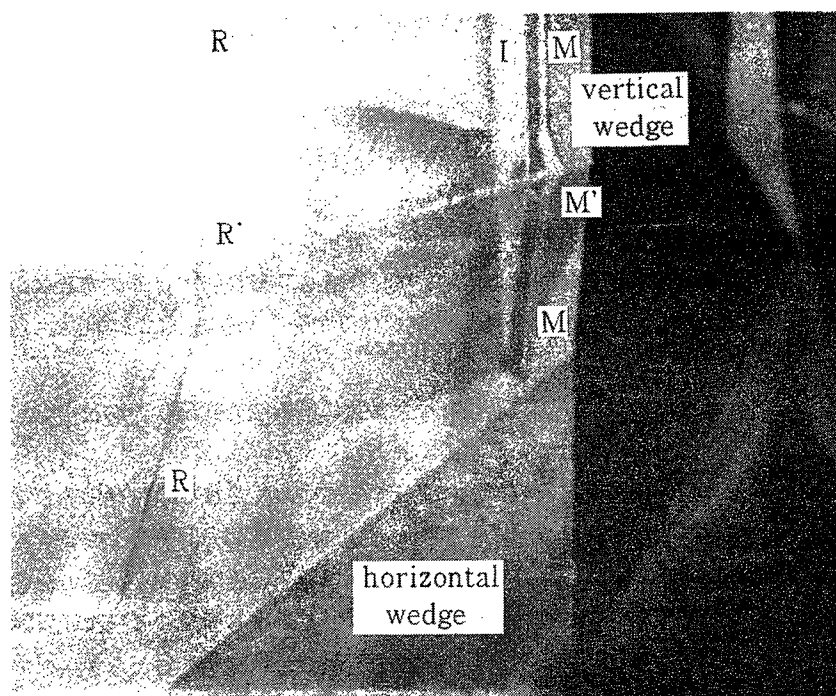
本章では、直交する二つのくさびを過ぎる衝撃波の三次元的反射を実験的、数値的、理論的に解析した。実験は、100mm×180mmの無隔膜衝撃波管と二重露光時間間隔を非常に短くした物体光に拡散光を用いる二重露光ホログラフィー干渉計法により、衝撃波の三次元的反射を可視化した。また、加重平均流束法を用いて、衝撃波の三次元的反射の数値計算を実施した。その結果、三次元的な衝撃波の反射構造および図1に示す三次元的干渉の結果現れる三次元的マッハステムの突出現象の存在をはじめて明らかにし、三次元的マッハステム形成について考察を述べた。また、今まで不明であった衝撃波の三次元的反射形態を、以下のように、四種類の形態に分類できることをはじめて明らかにした。

- (1) 三次元的マッハステムが現われる、二つのマッハ反射の三次元的干渉
- (2) 三次元的マッハステムが現われる、マッハ反射と正常反射の三次元的干渉
- (3) 三次元的マッハステムが現われない、マッハ反射と正常反射の三次元的干渉
- (4) 三次元的マッハステムが現われない、二つの正常反射の三次元的干渉

数値計算により、衝撃波の三次元的な反射に誘起される圧力および温度の上昇などを明らかにした。

さらに、この衝撃波の三次元的反射に、二次元斜め衝撃波の反射理論を適用し、数値計算の結果と比較した。まず、衝撃波の三次元的反射を衝撃波極線法で近似し、三次元的干渉部の圧力を解析的に求める方法を示した。その結果は数値計算と良く一致した。傾き角が同じ二つのくさび上でそれぞれマッハ反射が現われる場合について、二衝撃波理論あるいは三衝撃波理論を適用し、三次元的マッハステムの三重点軌跡角を求めた。結果は数値計算と良く一致した。した

がって、三次元的干渉部は自己相似的な現象であることを明らかにした。また、離脱基準を適用し、マッハ反射と正常反射が三次元的に干渉する場合の三次元的マッハステムが現われる臨界条件を解析的に明らかにし、四種類の反射形態が現われる条件を解析的に求め、二つのくさび傾き角および衝撃波マッハ数の関係で示した。



I : incident shock wave, R : reflected shock wave, R' : 3-D reflected shock wave
M : Mach stem, M' : 3-D Mach stem

図1 三次元マッハステム

第5章 結 論

本章は結論であり、本研究で得られた結果について総括した。

審 査 結 果 の 要 旨

衝撃波の反射は典型的な非線形現象として知られ、また、衝撃波工学の重要な基礎研究課題である。反射衝撃波の形態は衝撃波の強さとその壁面となす角度によってマッハ反射から正常反射に遷移する。しかし、従来の研究は二次元的な衝撃波の反射に限られ、二次元的な反射衝撃波の遷移臨界角が三次元的な衝撃波反射にも正しく適用されるか否か不明である。

本論文は、衝撃波の三次元反射について、実験的、理論解析的、数値解析的な研究の成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、無隔膜衝撃波管の開発とその特性の解明に関する研究結果を述べ、数値解析的に無隔膜衝撃波管の作動を最適化し、その結果を断面100mm×180mm衝撃波管に応用して、従来の衝撃波管では達成できなかったマッハ数5（空気）以下の衝撃波をマッハ数のばらつき±0.3%以下という実験精度で発生することに成功している。これは重要な成果である。

第3章では、衝撃波の三次元的反射の数値解析に最適な様々な数値解析法を評価し、加重平均流束法が衝撃波の三次元的反射の記述に最も適当なことを明らかにしている。

第4章では、第2章で開発した無隔膜衝撃波管のなかに直交する二つのくさびを取付け、そこを通過する衝撃波の反射を物体光に拡散光を用いる二重露光ホログラフィー干渉計で、特に、二重露光間隔を1マイクロ秒に設定することによって衝撃波の三次元的な観測に成功し、さらに、二つのくさびの傾き角と衝撃波マッハ数とを種々組み合わせ、実験的、数値解析的に、また、衝撃波極線法による理論解析で直交くさびを過ぎる衝撃波の三次元反射形態を解明し、さらに、その発生領域の分類に成功している。これは衝撃波工学の分野に新しい知見をもたらすもので、重要な研究成果である。第5章は結論である。

以上要するに本論文は、直交する二つのくさびを過ぎる衝撃波の三次元的反射現象を、衝撃波管を用い詳細に可視化し、実験的、理論的ならびに数値解析的に明らかにし、流体力学、衝撃波工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。